



Licence Sciences et Techniques (LST)  
**GENIE CHIMIQUE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**Essai de dimensionnement d'un échangeur de chaleur  
tubulaire au sein de LCM « AICHA »**

**Présenté par :**

◆ Hajar JABKHIRO

**Encadré par :**

◆ Mr. M. EL AMRAOUI (LCM)

◆ Pr. A. ZEROUALE (FST)

**Soutenu Le 16 Juin 2015 devant le jury composé de:**

- Pr. A. ZEROUALE
- Pr. N. IDRISSE KANDRI
- Pr. A. EL GHAZOUALI

**Stage effectué à : LES CONSERVES DE MEKNES (LCM) « AICHA »**

**Année Universitaire 2014 / 2015**

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES

☒ B.P. 2202 - Route d'Imouzzer - FES

☒ Ligne Directe : 212 (0)5 35 61 16 86 - Standard : 212 (0)5 35 60 82 14

Site web: <http://www.fst-usmba.ac.ma>

# Remerciements

C'est avec enthousiasme que j'ai effectué ce stage au sein de la société «Les conserves de Meknès». C'est alors avec reconnaissance que je présente mes remerciements à Mr. Mardochée DEVICO, président-directeur général des conserves de Meknès pour m'avoir offert cette occasion de stage.

Je tiens à remercier mon maître de stage Mr. Mohammed AMRAOUI, responsable de production pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien.

Je remercie aussi Mr. Ahmed LAKHDAR, directeur des activités de raffinerie pour ses précieux conseils et son soutien permanent.

J'adresse mes remerciements à mon professeur et encadrant Mr. ZEROUALE pour l'encadrement contentieux dont il a fait preuve.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes professeurs Mr. IDRISSI KANDRI et Mr. EL GHAZOUALI d'avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens également à exprimer mon ample reconnaissance à mon professeur Mr. Mohammed CHAOUQI pour son soutien permanent, sa disponibilité et son encouragement.

Je remercie vivement et sans exceptions tout le personnel du service raffinerie, ainsi que celui du service qualité pour leur accueil sympathique et leur coopération professionnelle tout au long de mon stage.

Et il m'est particulièrement agréable d'exprimer mes sincères remerciements à ma famille et mes amis pour leur présence indispensable et leur soutien moral salutaire.

# Liste des photos, figures et tableaux

<u>Photo 1</u> : Mélangeur 1 (M1).....	<b>8</b>
<u>Photo 2</u> : Séparateur 1 (S1).....	<b>10</b>
<u>Photo 3</u> : Réacteur (R1).....	<b>12</b>
<u>Photo 4</u> : Filtres à bougies.....	
<u>Photo 5</u> : Filtres à poches.....	
<u>Photo 6</u> : Désaérateur.....	<b>14</b>
<u>Photo 7</u> : Colonne de désodorisation.....	
<u>Photo 8</u> : Echangeur à multitubulaire.....	<b>17</b>
<u>Photo 9</u> : Echangeur à plaques et joints (1).....	<b>18</b>
<u>Photo 10</u> : Echangeur à plaques (2).....	
<u>Figure 1</u> : Joints d'échangeur à plaques positionnés en alternance et assurant la distribution de chaque fluide une plaque sur deux.....	<b>18</b>
<u>Figure 2</u> : Echangeur tube calandre à une passe calandre et deux passes tubes.....	<b>22</b>
<u>Figure 3</u> : Echangeur à contrecourant.....	
<u>Figure 4</u> : Echangeur à co-courant.....	
<u>Tableau 1</u> : Ordres de grandeur des coefficients globaux $U_s$ .....	<b>21</b>
<u>Tableau 2</u> : Données sur les fluides et matériau.....	<b>29</b>
<u>Tableau 3</u> : Résultats du dimensionnement.....	<b>30</b>
<u>Tableau 4</u> : Normes respectées par la société pour chaque analyse.....	<b>Annexe</b>
<u>Tableau 5</u> : Objectifs de qualité.....	<b>Annexe</b>

# Sommaire

Introduction.....	1
-------------------	---

## **Chapitre A : Présentation générale**

1. Présentation de l'entreprise.....	2
1.1. Historique.....	
1.2. Fiche signalétique.....	
1.3. Activités et produits.....	3
1.3.1. Activités.....	
a. Agriculture.....	
b. Conserverie.....	
c. Huilerie.....	
d. Raffinerie.....	
1.3.2. Produits.....	4
2. Généralités sur les huiles.....	5

## **Chapitre B : Raffinage des huiles**

Introduction.....	6
Processus de raffinage.....	7
1. Dégommage ou démulcination.....	
1.1. Types de phospholipides.....	
1.2. Inconvénients des phospholipides.....	
1.3. Mode opératoire.....	8
2. Neutralisation.....	
2.1. Ajout de NaOH, mixage et centrifugation.....	9
2.2. Lavage.....	10
3. Décirage.....	11
4. Décoloration.....	12
4.1. Principe.....	
4.2. Etapes.....	
5. Désodorisation.....	13
5.1. Principe.....	
5.2. Etapes.....	
6. Fortification.....	14
7. Conditionnement.....	15
8. Stockage.....	

## **Chapitre C: Dimensionnement d'un échangeur de chaleur**

<b>I-</b>	<b>Introduction au calcul des échangeurs de chaleur.....</b>	<b>16</b>
<b>1.</b>	<b>Généralités.....</b>	
<b>1.1.</b>	<b>Transferts thermiques.....</b>	
<b>1.2.</b>	<b>Principe d'un échangeur de chaleur.....</b>	
<b>1.3.</b>	<b>Principaux types d'échangeurs.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.1.</b>	<b>Echangeurs à tubes coaxiaux.....</b>	
<b>1.3.2.</b>	<b>Echangeurs à plaques.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3.3.</b>	<b>Echangeurs à spirale.....</b>	
<b>2.</b>	<b>Outils de calcul.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.</b>	<b>Coefficients d'échange.....</b>	
<b>2.2.</b>	<b>Distribution des températures dans un échangeur.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>Echangeur à une seule passe.....</b>	<b>23</b>
<b>a.</b>	<b>1er cas : U constant le long de l'appareil.....</b>	
<b>b.</b>	<b>2ème cas : U varie le long de l'appareil.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Echangeur multi passes.....</b>	
<b>2.3.</b>	<b>Efficacité d'un échangeur de chaleur.....</b>	
<b>2.4.</b>	<b>Détermination du coefficient d'échange par convection.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1.</b>	<b>A l'intérieur des tubes.....</b>	
<b>2.4.2.</b>	<b>A l'extérieur des tubes.....</b>	
<b>2.5.</b>	<b>Pertes de charge dans les échangeurs.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1.</b>	<b>A l'intérieur des tubes.....</b>	
<b>2.5.2.</b>	<b>A l'extérieur des tubes.....</b>	
<b>II-</b>	<b>Dimensionnement d'un échangeur de chaleur.....</b>	<b>27</b>
<b>1.</b>	<b>Différentes phases du dimensionnement.....</b>	
<b>2.</b>	<b>Données sur les fluides et matériau.....</b>	<b>28</b>
<b>3.</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>29</b>
	<b>Conclusion.....</b>	<b>30</b>

# Introduction

Le secteur de l'agroalimentaire joue un rôle primordial dans l'économie marocaine. « Les Conserves de Meknès » est l'une des plus grandes unités industrielles dans ce domaine.

La conserverie et le raffinage des huiles constituent les principales activités de cette unité.

Grâce à sa raffinerie, la société contribue à l'autosuffisance alimentaire en huile de table et participe dans le commerce international marocain grâce à ses exportations.

Afin d'améliorer les connaissances scientifiques et techniques, on est amené à effectuer un stage de fin d'études au sein d'une unité industrielle.

Ce stage a été effectué au sein de « Les Conserves de Meknès ».

Le but de notre stage est de dimensionner un échangeur de chaleur tubulaire pour remplacer l'échangeur à plaques et joints existant et diminuer ainsi les pertes de charge.

Notre apport est constitué de trois parties

- Présentation générale de l'organisme d'accueil et généralités sur les huiles.
- Description détaillée du processus du raffinage.
- Dimensionnement d'un échangeur de chaleur tubulaire : calcul d'un échangeur.

Et enfin, on ferme par une conclusion générale.

# Chapitre A

## Présentation générale

# 1. Présentation de l'entreprise

## 1.1. Historique

La marque Aicha créée en 1929, destinait la majorité de sa production à l'export vers les marchés américains et européens, avec des produits phares comme la truffe blanche, les fruits au sirop et les légumes en conserves.

Dans les années 70, l'unité de conserve a connu une nouvelle impulsion suite à une restructuration. L'usine est agrandie et la production est diversifiée pour mieux répondre aux besoins locaux. Les conserves de Meknès, qui a fondé sa réputation d'excellence autour de la célèbre marque de confitures Aicha, a alors étendu son savoir-faire au concentré de tomates, à l'huile d'olive et aux huiles raffinées.

C'est ainsi que Aicha a su au fil du temps conquérir les cœurs et le marché grâce à une expérience constante de qualité et d'authenticité qui lui a permis de devenir une référence du secteur agro-alimentaire à l'échelle nationale et internationale.

## 1.2. Fiche signalétique

❖	<b>Raison sociale :</b> Les conserves de Meknès – Aicha (LCM)
❖	<b>Forme juridique :</b> Société anonyme
❖	<b>Date de création de la marque :</b> 1929
❖	<b>Capital :</b> 110 000 000 DH
❖	<b>Siège social :</b> Quartier Industriel-Ain Slougi, BP : 217, Meknès, Maroc ; Standard : 05-35-50-17-90/94 ; Fax : 05-35-50-16-42 ; E-mail : aicha@aicha.com
❖	<b>Registre de commerce :</b> Meknès 13967
❖	<b>C.C.P :</b> Rabat 51-851L
❖	<b>CNSS :</b> N° 1703075
❖	<b>N° patente :</b> 17307131
❖	<b>I.F :</b> N° 04100627
❖	<b>Secteur d'activité :</b> Agro-alimentaire
❖	<b>Activités principales :</b> Conserverie, raffinerie, huilerie
❖	<b>Superficie de l'usine :</b> 70 000 m <sup>2</sup> dont 35 000 couverts
❖	<b>Effectif du personnel :</b> 260 à 400 salariés selon les saisons
❖	<b>Capacité de production :</b> Confiture : 160 T/j ; Concentré de tomates : 3000 T de tomates/j ; Huile d'olive : 500 T d'olives/j ; Huile raffinée : 150 T/j.



## 1.3. Activités et produits

### 1.3.1. Activités

#### a. Agriculture

« Les Conserve de Meknès » s'est toujours attaché à développer ses activités agro-alimentaires afin d'assurer la maîtrise de ses approvisionnements en matières premières de qualité. Cette démarche originale a permis à la société d'acquérir une expérience remarquable dans la culture de la fraise, de la tomate, de l'olive, de l'abricot, des agrumes et un savoir-faire qu'elle étend aujourd'hui à tous les fruits qu'elle transforme.

#### b. Conserverie

Les produits portant le label Aicha sont transformés à partir de matières premières rigoureusement sélectionnées à la source. L'entreprise choisit en effet chaque année ses fournisseurs agréés dans les différentes régions agricoles et suit les cultures jusqu'à maturité.

Récoltés à la main et transportés dans les meilleures conditions afin d'être préservés au mieux, les fruits et les légumes sont ensuite triés dès leur réception à l'usine avant de rejoindre les lignes de production.

Les étapes de transformation se succèdent alors en circuit fermé selon des règles d'hygiène les plus strictes et un savoir-faire approuvé.

#### c. Huilerie

Premier exportateur d'huile d'olive et acteur clé de la production d'huile d'olive au Maroc, LCM dispose sur son site d'une huilerie moderne, certifiée ISO 22000 et PIAQ et agréée par la U.S FDA, pourvue de cinq lignes de fabrication totalisant une capacité de traitement de 500 T d'olives/j. LCM propose des conditionnements en bouteille en verre ou en PET recyclable, garantissant la parfaite stabilité des qualités gustatives de l'huile d'olive Aicha, dans des conditions optimales de conservation.

#### d. Raffinerie

Véritable structure-pilote inauguré en 2000, l'unité de raffinage Aicha, conçue et installée par le constructeur suédois Alfa Laval, est l'une des raffineries les plus modernes au monde. Elle garantit un traitement optimal de l'huile végétale visant à préserver des qualités organoleptiques.

Un laboratoire intégré, également à la pointe dans son domaine, assure en direct les analyses tout au long du cycle de raffinage. L'huile est ensuite stockée en citerne d'inox, sous température ambiante régulièrement contrôlée.

Afin de maîtriser totalement la pureté des produits commercialisés, LCM a équipé la raffinerie de sa propre ligne de conditionnement exécutant en circuit fermé toutes les opérations, du soufflage des bouteilles en PET jusqu'à la mise en cartons. Le choix du PET, matériau recyclable offrant d'excellentes propriétés en termes de conservation, témoigne également de l'engagement de l'entreprise quant à la protection de l'environnement.

### 1.3.2. Produits

Le concentré de tomates Aïcha est à base de tomates fraîches rigoureusement sélectionnées. Grâce à la qualité de sa recette unique et naturelle et aux soins apportés quant à son élaboration, le concentré de tomates Aïcha relève le goût et la saveur des préparations, rend les sauces plus onctueuses et donne une belle couleur rouge aux plats.

Aïcha, n'est pas seulement le concentré de tomate, c'est aussi une quinzaine de produits, une gamme de 16 confitures, 4 sauces pour tajines, 4 sauces préparées, sauce pizza, citrons Beldis, piments, câpres, caprons, olives, artichauts, truffes, huile d'olive, huile d'argan et les huiles végétales.

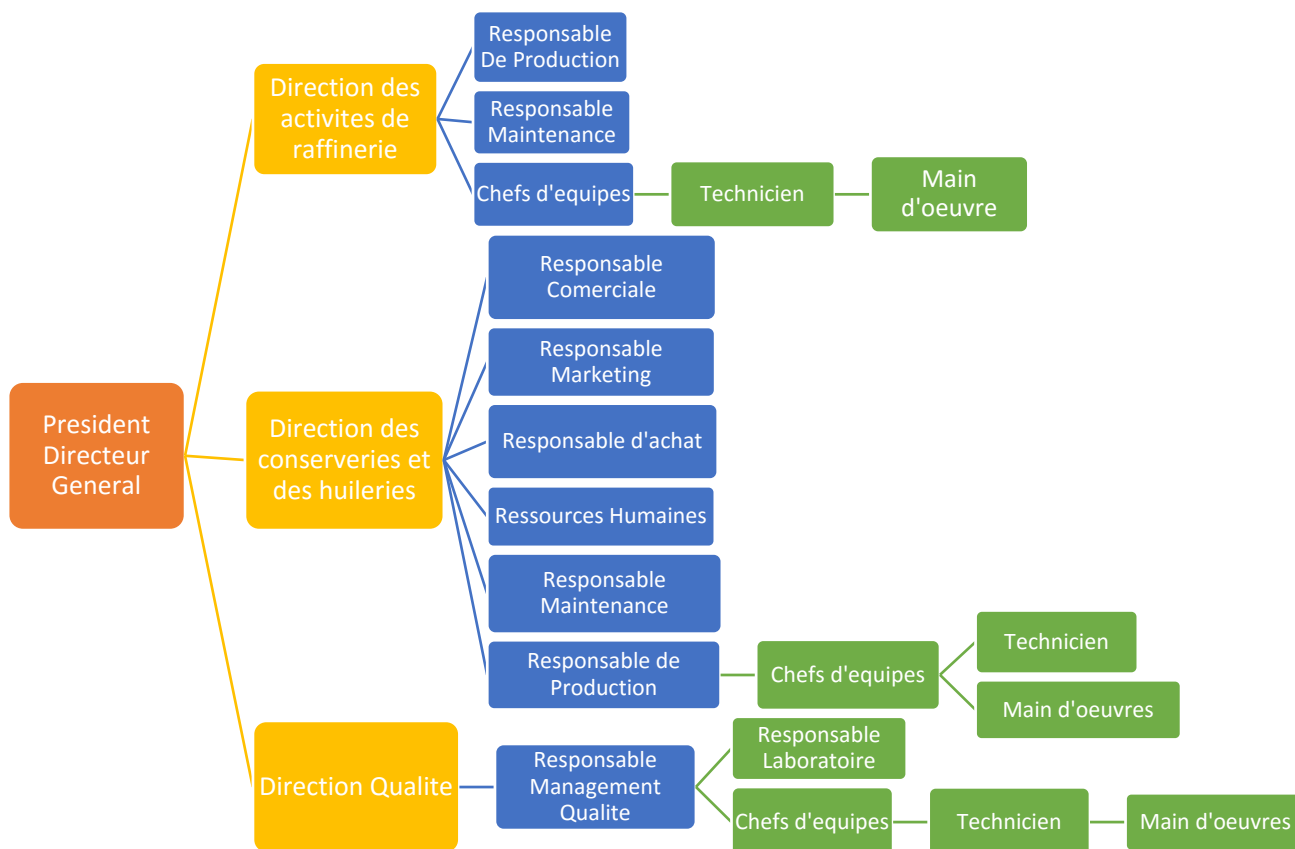


Figure 1 : Organigramme de "LCM"

## 2. Généralités sur les huiles

Les huiles sont des liquides gras, visqueux qui ne se mélangent pas à l'eau. Elles se différencient des graisses qui sont pâteuses dans les conditions normales d'utilisation.

On distingue : les huiles alimentaires, les huiles essentielles, l'huile minérale, l'huile moteur et les huiles de synthèse.

Elles ont plusieurs utilisations notamment un usage alimentaire, en tant que combustible, carburant ou lubrifiant, en savonnerie, en hydraulique, dans les peintures, dans les parfums, etc. Les huiles alimentaires sont couramment utilisées en cuisine. Dans l'industrie, elles sont utilisées pour les mêmes usages, mais en quantités beaucoup plus importantes.

Les huiles sont un mélange de triglycérides différents dont la composition moyenne est connue. Leur teneur élevée en acides gras mono-insaturés ou polyinsaturés est bénéfique pour la santé. Chaque huile a une composition en acides gras différente.

Pour chaque huile, il existe un point de fumée qu'il ne faut pas atteindre ou dépasser. Quand l'huile atteint le point de fumée, ses composants se dégradent, forment des composés toxiques (benzo-a-pyrène) et l'huile fume. C'est pour cela que certaines huiles sont déconseillées pour la cuisson.

Les huiles doivent être protégées de l'air et de la lumière ainsi que de la chaleur. L'oxydation a lieu plus vite sous l'effet des rayons ultraviolets, de la chaleur ou en présence d'ions métalliques comme le  $Fe^{2+}$  ou  $Cu^{2+}$ . La réaction d'oxydation ou rancissement se produit lorsque les acides gras insaturés fixent l'oxygène de l'air : les doubles liaisons sont cassées et sont remplacées par des liaisons avec des atomes d'oxygène. Le goût devient âcre, l'odeur désagréable et des composés indésirables qui peuvent être dangereux pour la santé (acides gras libres et peroxydes) apparaissent.

Il faut savoir, en effet, que les lipides sont deux fois plus riches en calories que les glucides ou les protéides. Et l'on sait aussi que les huiles ont un rôle essentiel au plan immunomodulateur. De plus elles interviennent dans la régulation de l'allergie et de tous les phénomènes inflammatoires, du rhumatisme aux angines chroniques en passant par les dermatoses. Elles interviennent aussi très favorablement dans les processus cardio-vasculaires en limitant les mauvais cholestérols et en favorisant les bons. Elles sont encore antiagrégants plaquettaires...

Les principales huiles végétales, en termes de production, sont : l'huile d'argan, l'huile de colza, l'huile de coprah, l'huile de maïs, l'huile de noix, l'huile d'olive, l'huile de palme, l'huile de pépins de raisin, l'huile de ricin, l'huile de sésame, l'huile de soja, l'huile de tournesol, etc.

# Chapitre B :

## Raffinage des huiles

## Introduction

Le raffinage constitue une étape clé de la technologie de production des huiles et corps gras d'origine végétale ou animale, permettant d'obtenir une qualité conforme aux exigences des différents secteurs utilisateurs.

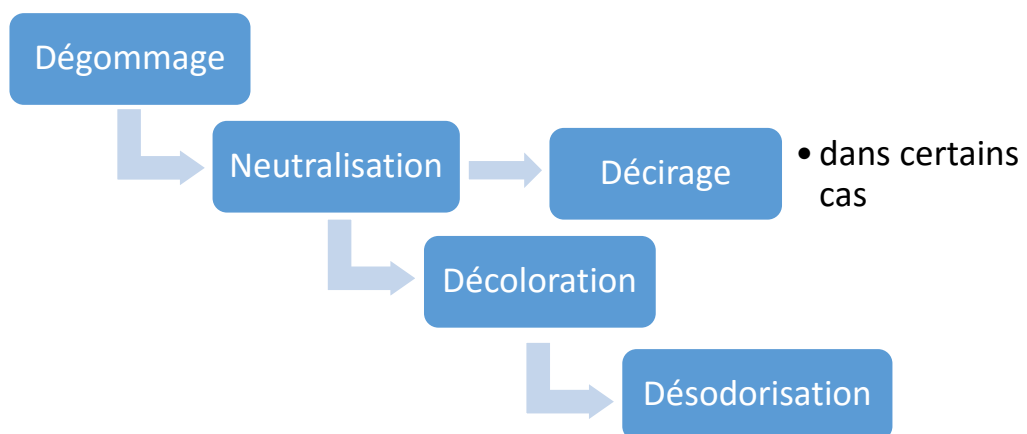
En effet, les huiles contiennent de nombreux composés : certains sont très utiles (vitamines, insaponifiables, ...), d'autres sont nuisibles à leur qualité (gommes, acides gras libres, pigments, agents odorants, ...). Le raffinage consiste donc à séparer de la matière noble, ces différentes impuretés ou composés indésirables afin d'obtenir une huile de la qualité requise pour un bon usage et une bonne conservation.

Il s'agit de fournir, d'une part au consommateur une huile raffinée répondant à ses attentes (huile limpide, peu colorée, plate de goût et stable) et d'autre part, de garantir à l'industriel utilisateur une huile dont les spécifications sont conformes à un cahier de charges précis et complet.

Le raffinage est défini par la réglementation nationale : il a pour but de maintenir ou d'améliorer les caractères organoleptiques et la stabilité des corps gras alimentaires et constitue un traitement licite des graisses et huiles comestibles à l'exception des huiles vendues sous la dénomination « huile vierge ».

Pour atteindre cet objectif, différentes opérations physico-chimiques sont nécessaires, elles-mêmes définies par la réglementation qui précise les substances autorisées pour leur mise en œuvre et, pour certaines d'entre elles, une limite maximale de résidu dans les corps gras raffinés. Les Conserve de Meknès « Aïcha » raffine des huiles brutes de : Soja, tournesol, grignon d'olives et de l'huile d'olive d'acidité supérieur à 3,3%.

La partie subséquente portera sur les différentes opérations composant le raffinage :



# Processus de raffinage

## 1. Dégommage ou démucilagination

Cette opération consiste à éliminer de l'huile brute les phospholipides, les protéines et d'autres substances colloïdales en suspension, par agglomération.

Les teneurs de l'huile brute en ces phospholipides dépend du mode de trituration employé. En effet, cette opération n'est réalisée que sur des huiles de soja et de tournesol de teneur en phospholipides supérieur à 10 ppm à cause de leur extraction par solvant (hexane).

### 1.1. Types de phospholipides

On distingue deux types de phospholipides

- Les phospholipides hydratables : Ces formes contiennent un groupe fortement polaire. Ils sont aisément éliminés par une centrifugation après un simple lavage.
- Les phospholipides non hydratables : Ce sont les sels de calcium et de magnésium, des acides phosphatidiques et des phosphatidylinositols. Ces formes non hydratables peuvent réagir avec des acides forts en donnant des sels monovalents et des acides. Elles deviennent alors hydratables et forment des composés insolubles dans l'huile. L'acide phosphorique est de loin l'acide le plus employé industriellement à cette étape, car il permet aussi de former des complexes avec les traces métalliques contenues dans les huiles, éliminés par la suite dans la pâte de neutralisation ou dans les eaux de lavage.

### 1.2. Inconvénients des phospholipides

- Les composés phosphorés forment des précipités dits de mucilages en présence d'eau. Une huile mal débarrassée de ces gommages s'acidifie, s'oxyde et prend rapidement un goût désagréable.
- Les phospholipides sont souvent liés à des métaux lourds catalyseurs d'oxydation.
- Les composés phosphorés ont des propriétés tensioactives. Ils peuvent former une émulsion au lavage qui mène à des pertes anormales.
- L'huile mousse au séchage.
- Désactivation des terres décolorantes.
- Colmatage rapide des filtres.
- Inhibition de la décoloration thermique lors de la désodorisation.

Ceci montre qu'une bonne démulcination assure le fonctionnement normal du reste des étapes du raffinage.

### 1.3. Mode opératoire

L'huile stockée dans des tanks balançoires, d'abord, traverse à un débit de 5000 l/h environ un échangeur à plaques qui augmente sa température aux environs de 80°C à 90°C. Ensuite, une pompe doseuse injecte de l'acide phosphorique à raison de 1 ‰, dans une conduite bien isolée en fibres de verre. Enfin, l'huile est acheminée vers un mixeur rapide (M1) présenté dans la photo (1).



*Photo 1 : Mélangeur 1 (M1)*

La centrifugation à l'aide du séparateur (S1) n'est appliquée qu'après la neutralisation, dans laquelle les phospholipides se trouvent éliminés dans la pâte de neutralisation.

## 2. Neutralisation

Toutes les huiles contiennent des acides gras libres, il s'agit d'un indicateur fiable de la qualité de l'huile puisque la teneur de ces acides gras libres dépend de la nature de l'huile, de son origine, des conditions de récoltes, des techniques de triturations ou d'extraction et de la durée du stockage.

La formation des acides gras se fait en deux manières : soit par une hydrolyse enzymatique des triacylglycérols dans les matières premières, soit par une hydrolyse chimique après extraction ou pendant le stockage.

La neutralisation consiste donc à éliminer les acides gras libres : catalyseurs des réactions d'oxydation et d'hydrolyse et responsables du goût acide de l'huile.

Le procédé génère des pâtes de neutralisation (qui peuvent être valorisées en savonnerie...) et des eaux de lavage prétraitées avant rejet.

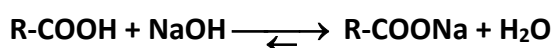
Le procédé traditionnel comprend les phases suivantes : addition d'une solution de soude, mélange, séparation par centrifugation, lavages à l'eau, séparation puis séchage sous vide.

## 2.1. Ajout de NaOH, mixage et centrifugation

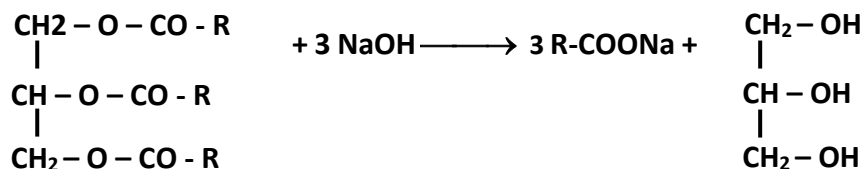
Il s'agit de l'ajout de la soude caustique dans l'huile pour saponifier tous les acides gras libres y présents.

La quantité de soude à employer est calculée à partir de l'acidité de l'huile exprimée le plus souvent en acidité oléique ou palmitique et dépend aussi de la quantité d'acide phosphorique préalablement utilisée.

Le principe de cette opération est basé sur la réaction de saponification suivante :



Pour une neutralisation complète, il est nécessaire de travailler avec un excès de sodes (5 à 10%), en tenant compte du temps de contact (3 à 4 min) pour empêcher toute réaction de saponification parasite de triacylglycérols : (Les R peuvent être différents)



En plus, de son rôle principal, la soude a un effet décolorant, elle permet de détruire un grand nombre de pigments et composés colorés d'origine oxydative.

L'huile sortant du malaxeur de la démulcination (où le conditionnement acide phosphorique a eu lieu) est acheminée vers un autre malaxeur où se fait l'ajout de la soude.

Cette addition produit des sels sous forme de savons, ils sont de puissants émulsifiants et contiennent des phospholipides ainsi diverses impuretés contaminants. C'est pourquoi, l'huile est envoyée ensuite à un séparateur centrifuge (photo 2) à deux phases : une phase solide (pâte de neutralisation) projetée à la périphérie et une phase liquide moins dense (l'huile) réceptionnée par la partie supérieure du séparateur.

A la fin de cette opération la pâte contenant les acides gras libres et les phospholipides est envoyée dans une cuve pour la décomposition, quant à l'huile est acheminée vers le lavage.



Les huiles de tournesol et de grignon d'olive passent d'abord par une étape de décirage avant d'être lavées à cause de leur teneur élevée en cires.



*Photo 2 : Séparateur 1 (S1)*

## 2.2. Lavage

Cette opération permet d'éliminer les savons et la soude en excès présents dans l'huile sortant du séparateur S1, ainsi que les dernières traces de métaux, de phospholipides et d'autres impuretés.

Elle permet d'assurer une bonne décoloration car les terres décolorantes riches en protons produisent en contact avec les savons des acides gras libres perturbant ainsi la décoloration.

Elle permet aussi de réduire les pertes en énergie et en matière à cause de l'excès de la soude qui peut engendrer une saponification parasite.

L'opération de lavage se fait en deux étapes pour des raisons physiques liées au coefficient de partage. Seules les huiles de tournesol et de grignon d'olives qui subissent un seul lavage après le décirage.

D'abord, l'huile est chauffée à une température de 90 - 95°C, puis elle est mélangée avec de l'eau adoucie et décalcifiée chaude (85-90°C). L'eau, par son caractère bipolaire, arrive à attirer les savons et la soude et à les emprisonner.

Ensuite, la phase aqueuse est séparée de la phase organique par une décantation accélérée par une centrifugeuse (S2). De la même manière, se déroule le deuxième lavage. Le séparateur est appelé (S3). L'huile est désormais neutralisée est prête à être acheminée vers la décoloration.

En ce qui concerne les eaux de lavage, elles contiennent forcément une quantité de matière entraînée avec l'eau. Du coup, avant d'être rejeté dans les égouts, elles sont acheminées vers un florentin où elles subissent une décantation afin de récupérer la matière grasse qu'elles contiennent. Elles sont aussi analysées pour déterminer le pourcentage de la matière grasse perdue.

### 3. Décirage

Cette opération concerne certaines huiles riches en cires comme le tournesol et le grignon d'olive.

Les cires sont des esters d'alcools gras et d'acides gras à longue chaîne qui cristallisent à température ambiante et présentent à ce titre des inconvénients lors de l'utilisation des huiles (trouble, dépôt).

Le décirage prend place après la première séparation et s'effectue comme suit :

- refroidissement de l'huile vers 8 - 10 °C par de l'eau froide.
- maturation des cristaux pendant 8 à 10 h avec l'addition de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluée (0,5 - 0,6%) servant comme support de cristallisation.
- Chauffage à 20°C pour faciliter la séparation des cires.
- Lavage avec de l'eau adoucie et séparation au niveau du séparateur(S3).
- Polissage (4 heures environ)
- Filtration à l'aide d'un adjuvant (prémixil) récupéré après.

### 4. Décoloration

#### 4.1. Principe

La décoloration vise à éliminer les pigments colorés ainsi que tous corps étrangers présents dans l'huile. Les pigments colorés (les β carotènes, les chlorophylles) sont des catalyseurs des réactions d'oxydation.

Cette opération fait intervenir un phénomène physique : une adsorption de ces pigments sur des terres décolorantes et sur une silice spéciale.

Cet agent ne joue pas uniquement un rôle décolorant par fixation des pigments colorés mais présente également un effet nettoyant par adsorption de divers composés indésirables présents dans l'huile qui se lient à la surface des adsorbants.

## 4.2. Etapes

Au préalable, l'huile provenant de la neutralisation doit être séchée pour éliminer l'humidité qui risque de colmater les filtres surtout en présence de traces de savons, de désactiver la terre par adsorption des molécules d'eau et aussi d'hydrolyser l'huile. L'huile neutralisée est ainsi chauffée aux environs de 105-110°C par la vapeur dans un échangeur à plaque.

Ensuite l'huile chauffée se trouve dispersée sur les terres décolorantes à l'intérieur du réacteur (photo 3) grâce à un système de pulvérisation. Le réacteur est équipé d'un thermo compresseur qui permet de créer un vide qui protège aussi l'huile de l'oxydation (pression <120 mbar). Il est aussi muni d'un système de barbotage par la vapeur.

Le temps de contact est de l'ordre de 25 min, assuré par des encoches qui jouent le rôle d'une barrière et qui affaiblissent la vitesse de passage.

Les terres décolorantes ajoutées proviennent d'une trémie située en dessus du réacteur, équipée d'un système de dosage automatisé. Grâce à un système mécanique de vibration, les terres s'ajoutent en pourcentage en fonction du débit de l'huile à décolorer.

Le mélange provenant du réacteur est envoyé pour la filtration. Il s'agit de deux filtres à bougies (photo 4) (pression = 6 bar) fonctionnant en alternance qui séparent l'huile des terres décolorantes. Un adjuvant de filtration (diatomées, célite ou attapulгите, gravier, sable) est avantageusement employé. Il permet à la fois d'empêcher les terres absorbantes de se coller entre elles, de créer le gâteau filtrant, pour empêcher les terres décolorantes de passer dans l'huile filtrée et de réduire la résistance du gâteau en augmentant sa porosité.



*Photo 3 : Réacteur (R1)*



*Photo 4 : Filtre à bougies*



*Photo 5 : Filtre à poches*

Le gâteau formé entre les parois doit être séché à la vapeur car il est auto inflammable à l'air vu qu'il contient encore une quantité d'huile et est obtenu à une température de 90°C. Ensuite il est décollé par un système de vibration puis refroidi par de l'eau.

Après la première filtration sur filtre à bougies, l'huile est filtrée à nouveau sur des filtres de sécurité (photo 5) pour se débarrasser des particules restantes, même de petites tailles. L'huile est ainsi décolorée et prête à être désodorisée.

## 5. Désodorisation

Aujourd'hui, les critères commerciaux exigent qu'une huile bien raffinée soit exempte d'odeur et de goût, c'est pour cette raison que l'huile est désodorisée.

La désodorisation vise à éliminer les substances volatiles responsables de l'odeur, et les acides gras libres restants encore.

### 5.1. Principe

Le principe de cette opération est une distillation simple de l'huile.

D'abord, les substances responsables de l'odeur de l'huile (acides gras volatiles, pigments) sont volatilisées par une augmentation de température de façon à ce qu'elle atteigne la température de leur ébullition. Ensuite, à l'état volatilisé, ces substances sont aspirées, condensées et récupérées. Finalement, l'huile obtenue ne contient aucune substance odorante et se trouve ainsi sans odeur.

### 5.2. Etapas

L'huile décolorée passe d'abord par une désaération pour éviter sa combustion sous haute température au cours de la désodorisation. Pour cela, l'huile est pulvérisée dans un désaérateur et mise en contact avec une vapeur sèche à une température de 90 à 100°C. Le thermo compresseur assure l'aspiration grâce à la création d'un vide (pression <80mbar) pour éliminer l'air et les matières volatiles.

Elle passe ensuite dans un échangeur à vapeur comme fluide caloporteur. Lorsqu'elle atteint la température recherchée 230 – 240 °C, elle est envoyée dans la colonne de distillation (photo 7).

Il faut noter que les huiles ne sont pas toutes chauffées jusqu'à 240 °C à cause de leurs différentes propriétés.

Le principe de cette distillation est d'injecter de la vapeur sèche dans l'huile maintenue à haute température et sous vide très poussé (0,2 – 3 mbar) pendant une quarantaine de minutes afin

d'entraîner les substances odorantes volatiles et les récupérer grâce à un système d'aspiration thermo compresseur. Ce thermo compresseur crée le vide pour que les substances odorantes passent à l'état gazeux à la température minimale et assure l'aspiration de ces substances vers les condenseurs.

L'huile récupérée à la fin de la colonne est sans odeurs et prête à passer à l'étape de refroidissement.



*Photo 6 : Désaérateur*



*Photo 7 : colonne de désodorisation*

Pour refroidir, l'huile passe successivement dans deux échangeurs à plaques économiseurs. Le principe de ces derniers est de refroidir l'huile désodorisée tout en réchauffant l'huile désaérée (premier échangeur) et l'eau adoucie (deuxième échangeur). A la fin de cette étape l'huile sort avec une température comprise entre 25 et 35 °C.

Elle traverse des pochettes poreuses de sécurité.

Au terme de cette étape, l'huile présente un goût neutre ; elle est par la suite conditionnée sous azote afin de la protéger contre l'oxydation.

### **❖ Remarque**

Les pompes utilisées pour transférer l'huile sont des pompes à clapet qui maintiennent le vide afin d'éviter de sérieux risques d'inflammation.

## **6. Fortification**

Cette étape concerne uniquement l'huile de Soja conditionnée.

C'est l'ajout de la vitamine A et D<sub>3</sub> à l'aide d'une pompe doseuse sous forme de premix dilué pour atteindre un objectif (30 unités de vitamine /100g d'huile) déterminé par le ministère de la santé.

## 7. Conditionnement

Le conditionnement de l'huile raffinée se fait dans des bouteilles de plusieurs formats et calibres de 1l à 5l, faites d'une matière plastique de Polyéthylène téréphtalique (PET) ; c'est une matière transparente qui laisse passer la lumière, en mettant en évidence, la clarté et la couleur de l'huile raffinée.

Le conditionnement de l'huile raffinée à la société Les Conserves de Meknès AÎCHA est semi-automatique. C'est un système qui comprend 5 étapes : Soufflage, remplissage, capsulage, étiquetage et mise en carton.

- Avant de commencer la mise en bouteilles, une machine automatique appelée souffleuse assure la fabrication de ces bouteilles. Son principe est simple : Les préformes subissent une élévation de température puis un soufflage pour prendre la forme de bouteille.
- Le remplissage se fait à l'aide d'une remplisseuse automatique munie de vérins qui font monter les bouteilles à fur et à mesure qu'elles se remplissent (les font descendre après remplissage) et un capteur de niveau qui arrête le remplissage.
- Le capsulage est l'opération qui se fait après le remplissage des bouteilles, à l'aide d'une capsuleuse automatique, qui produit des bouteilles bien fermées par des bouchons en plastique.
- L'étiquetage est une opération qui consiste à coller les étiquettes sur les bouteilles à l'aide d'une étiqueteuse automatique
- Les bouteilles sont mises en carton, avant qu'elles soient stockées dans les entrepôts de stockage.

## 8. Stockage

Les matières grasses sont très instables, elles peuvent s'auto-oxyder au cours de leur stockage et ceci conduit à l'apparition de produits qui altèrent la saveur d'origine et donnent un goût de rancidité à l'huile.

Le stockage de l'huile raffinée se fait dans des cuves spéciales en inox à fond incliné ou conique pour éviter l'accumulation de sédiments difficiles à éliminer par la suite. Les citernes sont équipées d'un système d'injection d'azote. Cette injection se fait d'une façon périodique, elle protège l'huile raffinée de l'oxydation, par la création d'une couche empêchant la pénétration et le contact de l'air aux huiles.

L'air de stockage doit être sombre et sa température pas très haute, la chaleur favorise l'oxydation.



# Chapitre C :

## Dimensionnement d'un échangeur de chaleur

# I- Introduction au calcul des échangeurs de chaleur

## 1. Généralités

### 1.1. Transferts thermiques

Dans l'industrie, généralement un transfert de chaleur se fait entre un fluide chaud et un fluide froid.

Il existe trois principaux modes de transferts de chaleur:

- **Conduction** : le flux de chaleur traverse le corps A, l'interface A-B, et le corps B. Le flux est proportionnel à la conductivité thermique du matériau.

- **Convection** : le flux de chaleur est transporté par la matière en déplacement. Ses mouvements sont dits de convection naturelle sous l'influence de variations de densité et du champ de pesanteur, ou de convection forcée si le fluide est mis en circulation par une pompe ou une différence de pression.

- **Rayonnement** : le flux de chaleur est transporté sans transport de matière, sous forme d'ondes électromagnétiques (rayonnement solaire).

### 1.2. Principe d'un échangeur de chaleur

Le dispositif utilisé pour effectuer l'échange de chaleur s'appelle "Echangeur de Chaleur".

On le rencontre très fréquemment dans les procédés chimiques, mais il intervient aussi dans les systèmes de conditionnement d'air, dans les engins spatiaux, dans les unités de production d'énergie, etc.

On cherche en général à transférer un flux de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid, séparés par une paroi qui peut être plane ou tubulaire. La chaleur est transférée par conduction et/ou convection au sein de chaque fluide et par conduction au sein du matériau qui les sépare. Il peut également y avoir transfert par rayonnement si le niveau de température dépasse 100°C.

Dans l'échangeur, chacun des fluides s'échauffe, se refroidit ou change d'état selon ses caractéristiques et les conditions opératoires. Le flux de chaleur résultant, cédé par le fluide chaud et reçu par le fluide froid est proportionnel à : un coefficient d'échange thermique global noté U. Fonction des conditions d'écoulement, des conductivités thermiques de chaque fluide, des viscosités, du changement d'état, d'un écart de température, de la surface d'échange thermique utilisée.



### 1.3. Principaux types d'échangeurs

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur que l'on peut classer en fonction de la disposition relative des deux fluides.

#### 1.3.1. Echangeurs à tubes coaxiaux

La configuration la plus simple est celle dans laquelle les deux fluides se meuvent soit dans le même sens soit en sens contraire dans des tubes coaxiaux (ou concentriques).

En pratique, les échangeurs à tubes coaxiaux ne permettent pas d'obtenir des surfaces d'échange de grande étendue.

C'est pourquoi, on dispose fréquemment un faisceau de tube à l'intérieur d'une enveloppe dénommée "calandre", l'un des fluides circulant à l'intérieur des tubes et l'autre autour des tubes à l'intérieur de la calandre. En général, on ajoute des chicanes qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et donnent naissance à une composante de vitesse orthogonale aux tubes. Il en résulte une augmentation du coefficient de transfert à la surface externe des tubes. Ce type est appelé échangeur multitubulaire ou à faisceau de tubes.

Afin de diminuer l'encombrement des échangeurs tubes calandre (en longueur principalement) et d'améliorer les conditions de transfert, on oblige fréquemment le fluide à traverser successivement plusieurs sections du faisceau de tubes. On parle alors d'échangeur à multi passes tubes. De la même façon, on peut obliger le fluide à passer successivement dans deux ou plusieurs parties de la calandre et l'on parle alors d'échangeur à multi passes calandre.



*Photo 8 : Echangeur multitubulaire*

### 1.3.2. Echangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques, de développement relativement récent, permettent d'atteindre des compacités encore plus élevées que les échangeurs multitubulaires. Ils consistent en une succession de plaques de métal entre lesquelles circulent alternativement les fluides froid et chaud.

Les flux sont chacun divisés en  $\frac{(n-1)}{2}$  courants ( $n$  étant le nombre de plaques) qui s'écoulent chacun entre deux plaques. Ainsi, chaque élément de fluide ne fait qu'un seul passage entre deux plaques.

Les plaques sont par ailleurs généralement rugueuses, de façon à améliorer le transfert de chaleur. Il en résulte toutefois une augmentation de la perte de charge à la traversée de l'appareil.

Il existe :

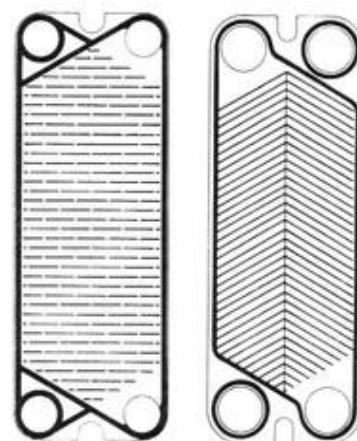
- des échangeurs à plaques et joints pour des températures et pressions modérées.
- des échangeurs à plaques brasées pour des températures et pressions élevées.



*Photo 9 : Echangeur à plaques et joints (1)*



*Photo 10 : Echangeur à plaques et joints (2)*



*Figure 1 : Joints d'échangeur à plaques positionnés en alternance et assurant la distribution de chaque fluide une plaque sur deux*

### 1.3.3. Echangeurs à spirale

L'échangeur de chaleur spiralé est constitué de deux bandes de métal soudées formant une spirale composée de deux canaux distincts continus et étanches. Le fluide chaud passe par un premier canal tandis que le second transite par le second. Le transfert de chaleur s'opère à travers les parois des canaux.

## 2. Outils de calcul

### 2.1. Coefficients d'échange

Considérons un échangeur tubulaire dans lequel on fait circuler deux fluides. Le fluide chaud circule à l'intérieur des tubes.

En régime permanent, les débits de fluide sont constants et la température en tout point de l'appareil est constante.

Le transfert de chaleur met en jeu trois résistances :

- Une résistance à la convection entre le fluide chaud et la surface interne des tubes. (1)
- Une résistance à la conduction dans la paroi des tubes. (2)
- Une résistance à la convection entre le fluide froid et la surface externe des tubes. (3)

Soit  $h_i$  et  $h_e$  les coefficients superficiels d'échange respectifs correspondant aux résistances (1) et (3) et  $dA_i$  et  $dA_e$  les aires de surfaces correspondantes. Ces coefficients sont des coefficients locaux car leur valeur est susceptible de varier le long des tubes. Ils s'expriment en  $kcal/h m^2 \text{ } ^\circ C$  ou  $W/m^2 K$ .

- $h_i$  est appelé coefficient local interne particulier d'échange.
- $h_e$  est appelé coefficient local externe particulier d'échange.

Appelons  $\lambda_t$  la conductivité thermique du matériau constituant les tubes.

Le flux de chaleur  $dQ$  échangé entre les deux fluides est :

$$dQ = \frac{\theta_c - \theta_f}{\frac{1}{h_i dA_i} + \frac{e}{\lambda_t dA_m} + \frac{1}{h_e dA_e}}$$

Avec :

$$dA_m = \frac{dA_i + dA_e}{2}$$

Posons :

$$\frac{1}{U dA} = \frac{1}{h_i dA_i} + \frac{e}{\lambda_t dA_m} + \frac{1}{h_e dA_e}$$

On peut écrire alors :

$$dQ = U dA (\theta_c - \theta_f)$$

$U$  Est appelé coefficient local global d'échange.

Il faut choisir pour  $dA$  une valeur de référence pratique.

Il est d'usage de choisir comme aire de référence celle qui correspond à la résistance thermique la plus grande.

Nous avons donc trois possibilités :  $dA = dAi$ ;  $dA = dAe$ ;  $dA = dAm$

Ce qui définit 3 coefficients globaux d'échange tel que :  $UdA = Ui dAi = Ue dAe = Um dAm$

Les trois coefficients n'ont de signification que par rapport à ces aires de références.

On a alors :

$$\frac{1}{Ui} = \frac{1}{hi} + \frac{e}{\lambda t \frac{dAm}{dAi}} + \frac{1}{he \frac{dAe}{dAi}}$$

Soit encore :

$$\frac{1}{Ui} = \frac{1}{hi} + \frac{e}{\lambda t \frac{De + Di}{2Di}} + \frac{1}{he \frac{De}{Di}}$$

Ou  $De$  et  $Di$  sont respectivement le diamètre extérieur et le diamètre intérieur des tubes.

De même :

$$\frac{1}{Ue} = \frac{1}{he \frac{Di}{De}} + \frac{e}{\lambda t \frac{De + Di}{2De}} + \frac{1}{he}$$

Et :

$$\frac{1}{Um} = \frac{1}{hi \frac{2Di}{Di + De}} + \frac{e}{\lambda t} + \frac{1}{he \frac{2De}{Di + De}}$$

Très souvent durant le fonctionnement d'un échangeur avec la plupart des liquides et parfois des gaz, un film d'encrassement s'amorce graduellement sur les surfaces des tubes. Son effet est d'ajouter des résistances supplémentaires au transfert, abaissant la performance de l'échangeur.

Ces résistances peuvent être exprimées sous la forme :

$$Rdi = \frac{1}{hdi dAi}; Rde = \frac{1}{hde dAe}$$

Le flux de chaleur échangé devient alors :

$$dQ = \frac{\theta_c - \theta_f}{\frac{1}{hi dAi} + \frac{1}{hdi dAi} + \frac{e}{\lambda t dAm} + \frac{1}{he dAe} + \frac{1}{hde dAe}}$$

De la même manière on pose :

$$\frac{1}{Us dA} = \frac{1}{hi dAi} + \frac{1}{hdi dAi} + \frac{e}{\lambda t dAm} + \frac{1}{he dAe} + \frac{1}{hde dAe}$$

Avec :  $Us$  coefficient global local d'échange pour l'échangeur encrassé.

On peut écrire alors le flux :

$$dQ = Us dA (\theta_c - \theta_f)$$

Et de la même manière :

$$\frac{1}{Ui} = \frac{1}{hi} + \frac{1}{hdi} + \frac{e}{\lambda t \frac{De + Di}{2Di}} + \frac{1}{he \frac{De}{Di}} + \frac{1}{hde \frac{De}{Di}}$$

Et :

$$\frac{1}{Ue} = \frac{1}{hi \frac{Di}{De}} + \frac{1}{hdi \frac{Di}{De}} + \frac{e}{\lambda t \frac{De + Di}{2De}} + \frac{1}{he} + \frac{1}{hde}$$

Et :

$$\frac{1}{Usm} = \frac{1}{hi \frac{2Di}{Di + De}} + \frac{1}{hdi \frac{2Di}{Di + De}} + \frac{e}{\lambda t} + \frac{1}{he \frac{2De}{Di + De}} + \frac{1}{hde \frac{2De}{Di + De}}$$

Le tableau si dessous regroupe les ordres de grandeur du coefficient global de transfert  $Us$ .

Fluide chaud	Fluide froid	$U_s$ (W/ m <sup>2</sup> °C)
Gaz	Gaz	10 – 50
Gaz	Liquide visqueux	20 – 50
Gaz	Liquide peu visqueux	20 – 80
Liquide visqueux	Gaz	20 – 50
Liquide peu visqueux	Gaz	20 – 80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100 - 200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100 - 300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700 - 1800
Vapeur se condensant	Liquide visqueux	200 - 400
Vapeur se condensant	Liquide peu visqueux	1000 – 2000
Vapeur se condensant	Liquide en ébullition	700 - 1500

**Tableau 1 : Ordres de grandeur des coefficients globaux  $U_s$**

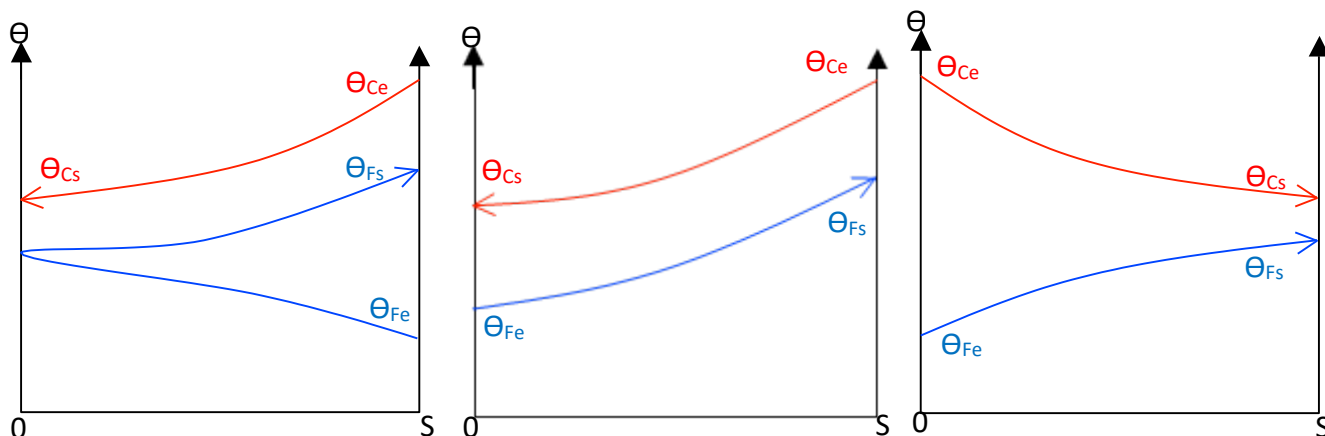
## 2.2. Distribution des températures dans un échangeur

Il est important de bien comprendre comment les températures varient dans un échangeur de chaleur.

Les températures des fluides évoluent effectivement pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante (uniquement durant le changement de phase d'un corps pur).

Les figures suivantes donnent l'allure de quelques distributions de température dans des échangeurs très simples.

On a porté en abscisses la valeur de la surface d'échange, variant depuis zéro, à l'entrée de l'appareil, jusqu'à sa valeur totale  $S$ , à la sortie de l'échangeur.



*Figure 2 : Echangeur tube calandre à une passe calandre et deux passes tubes*

*Figure 3 : Echangeur à contre-courant*

*Figure 4 : Echangeur à co-courant*

On remarque en particulier sur ces figures que:

- La température de sortie du fluide froid dans un échangeur tube calandre (figure 2) peut être supérieure à celle de sortie du fluide chaud, et que l'écart de température entre les deux fluides varie de façon non linéaire le long de l'échangeur.
- Dans un échangeur à contre-courant (figure 3), la température de sortie du fluide froid peut être supérieure à celle de sortie du fluide chaud, cette disposition étant l'une des plus favorables pour l'échange thermique.
- Dans un échangeur à co-courant (figure 4), les températures de sortie des deux fluides sont au mieux égales, et que l'écart de température diminue alors que l'on progresse le long de l'échangeur, ce qui diminue évidemment l'efficacité de l'appareil.

### 2.2.1. Echangeur à une seule passe

Considérons un échangeur tubulaire et supposons que le fluide chaud circule à l'intérieur des tubes. Soient  $W_c$  son débit massique et  $C_c$  sa chaleur spécifique. Appelons  $W_f$  et  $C_f$  respectivement le débit et la chaleur spécifique du fluide froid.

Nous supposerons que les chaleurs spécifiques sont constantes dans l'échangeur.

Soit  $dQ$  le flux de chaleur échangé entre les deux fluides à travers la surface  $dA$ .

On peut écrire :  $dQ = U dA (\theta_c - \theta_f) = U dA (\Delta\theta)$

Le problème à résoudre pour obtenir l'aire d'échange de l'appareil est l'intégration de cette équation en remarquant que  $\Delta\theta$  et le coefficient global d'échange  $U$  varient avec  $x$ .

Le flux de chaleur  $dQ$  est cédé par le fluide chaud :  $dQ = -W_c \cdot C_c \cdot d\theta_c$

Il est gagné par le fluide froid :  $dQ = -W_f \cdot C_f \cdot d\theta_f$

Soit en combinant les deux équations :

$$dQ = \frac{-d(\Delta\theta)}{\frac{1}{W_c \cdot C_c} - \frac{1}{W_f \cdot C_f}}$$

Posons :  $\Psi = \frac{1}{W_c \cdot C_c} - \frac{1}{W_f \cdot C_f}$

On en déduit :  $dQ = \frac{-d(\Delta\theta)}{\Psi}$

En combinant les équations on obtient :

$$\frac{-d(\Delta\theta)}{\Delta\theta} = \Psi \cdot U \cdot dA$$

#### a. 1<sup>er</sup> cas : U constant le long de l'appareil

Considérons que le coefficient global d'échange ne varie pas avec la distance. Les équations s'intègrent entre l'extrémité 1 et l'extrémité 2 de l'échangeur.

$$Q = U \cdot A \cdot \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{\text{Ln} \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2}}$$

Où A est l'aire d'échange et  $\Delta\theta_1 = \theta_{c1} - \theta_{f1}$  et  $\Delta\theta_2 = \theta_{c2} - \theta_{f2}$

## b. 2<sup>ème</sup> cas : U varie le long de l'appareil

Les coefficients locaux d'échange  $hi$  et  $he$  dépendent des propriétés physiques des fluides et sont donc fonction de leurs températures. En intégrant les équations entre l'extrémité 1 de l'appareil et une abscisse variable on peut déduire la relation entre  $\theta c$  et  $\theta f$  en chacun des points de l'appareil. On peut également déterminer le coefficient global d'échange de l'appareil  $U$  en fonction de

$\Delta\theta = (\theta c - \theta f)$ . On peut diviser cette courbe en segments que l'on assimilera à des droites.

Soit  $U = Uci (1 + ni \Delta\theta)$  l'équation de la droite sur le segment  $i$ .

On intègre l'équation entre  $i$  et  $i + 1$ , on obtient :

$$Qi = Ai. \frac{(Ui + 1) \Delta\theta i - Ui(\Delta\theta i + 1)}{\ln \frac{(Ui + 1)\Delta\theta i}{Ui(\Delta\theta i + 1)}}$$

Avec :  $Ai$  est l'aire du tronçon  $i$  de l'échangeur.

Il suffit donc de calculer la surface pour chaque tronçon et d'ajouter les surfaces correspondantes.

### 2.2.2. Echangeurs multi passes

Le calcul qui vient d'être effectué devient plus compliqué et les expressions trouvées plus complexes. On définit le facteur  $Y$  comme l'efficacité de l'appareil multi passes par rapport à l'appareil à contrecourant servant de référence.

Ainsi :  $Q = U.A.Y.\Delta\theta_{ml}$

Avec :  $\Delta\theta_{ml}$  moyenne logarithmique.

### 2.3. Efficacité d'un échangeur de chaleur

L'efficacité d'un échangeur de chaleur est définie comme le rapport du flux de chaleur réellement échangé entre les deux fluides, au flux maximum qui pourrait être échangé dans un appareil d'aire d'échange infinie fonctionnant à contrecourant.  $E = \frac{Q}{Q_{max}}$

Avec :  $Q_{max} = (W.C)_m (\theta_{ce} - \theta_{fe})$  et  $Q = Wc.Cc.(\theta_{ce} - \theta_{cs})$  **Et**  $(WC)_m$  Est la plus petite des quantités  $Wc.Cc$  et  $Wf.Cf$

Pour l'échangeur du type à contrecourant l'efficacité est déterminée par :



$$E = \frac{1 - e^{\frac{-U.A}{E(WC)m} \cdot (1 - \frac{(WC)m}{(WC)M}}}{1 - \frac{(WC)m}{(WC)M} e^{\frac{-U.A}{E(WC)m} \cdot (1 - \frac{(WC)m}{(WC)M}}}$$

## 2.4. Détermination du coefficient d'échange par convection

### 2.4.1. A l'intérieur des tubes

Le coefficient d'échange est déterminé par le nombre de Nusselt.

$$Nu = \frac{hm.D}{\lambda}$$

Avec :  $D$  diamètre du tube et  $\lambda$  conductivité thermique du fluide.

Dans le cas d'un écoulement laminaire :

$$Nu = 4,36 + \frac{0,104 \cdot (\frac{D}{L} Re \cdot Pe)}{1 + 0,0016 \cdot (\frac{D}{L} Re \cdot Pr)^{0,8}}$$

Avec :  $Pe = Re \cdot Pr$ ,  $Re = \frac{D \cdot Vm \cdot \rho}{\mu}$ ,  $Pr = \frac{Cp \mu}{\lambda}$

Dans le cas d'un écoulement turbulent, le coefficient est déterminé par le nombre de Stanton :

$$Nu = \frac{h}{Cp \cdot Vm \cdot \rho} = \frac{\frac{f}{2}}{1 + 1,15 (Pr - 1) Re^{-1/8}}$$

Avec :  $f = 0,079 \cdot Re^{-1/4}$

### 2.4.2. A l'extérieur des tubes

Espace enveloppe sans chicanes pour un liquide visqueux :

$$Nu = 0,6 \cdot Deq^{0,6} Re^{0,6} Pr^{1/3} = \frac{h \cdot De}{\lambda}$$

Avec :  $Deq = \frac{4 \cdot et \cdot el - \pi De^2}{\pi De}$ ,  $Re = \frac{DeG}{\mu}$ ,  $G = \frac{W}{\frac{\pi}{4}(Dc^2 - nDe^2)}$  avec  $Dc$  diamètre de la calandre

Espace enveloppe muni de chicanes à disques et couronnes pour un liquide visqueux :

$$Nu = 2,08 \cdot Deq^{0,6} Re^{0,6} Pr^{0,33}$$

## 2.5. Pertes de charge dans les échangeurs

### 2.5.1. A l'intérieur des tubes

$$\Delta P = f_D \times \frac{L}{D} \times \rho \frac{V^2}{2}$$

Avec :  $V$  vitesse du fluide dans les tubes,  $L$  longueur des tubes,  $D$  diamètre intérieur des tubes,  $f_D$  : coefficient de frottement

- Ecoulement laminaire :  $f_D = \frac{64}{Re}$
- Ecoulement turbulent :  $f_D = 0,3164 \times Re^{-1/4}$

### 2.5.2. A l'extérieur des tubes

Pour une enveloppe munie de chicanes, la perte de charge se décompose ainsi :

Perte de charge longitudinale à travers une chicane à segment :

$$\Delta P_L = G_L^2 / \rho$$

Perte de charge transversale entre deux chicanes :

$$\Delta P_T = N f_T G_T^2 / \rho$$

$N = \frac{Dc-h}{\sqrt{et.el}}$ ,  $f_T = 1,5 \left( \frac{\mu}{G \sqrt{et.el-Dc}} \right)^{0,2}$ ,  $h$  hauteur libre sur la chicane

$$\Delta P_{total} = n_{chicanes} \Delta P_L + \Delta P_T (n_{chicanes} - 1)$$

## II- Dimensionnement d'un échangeur de chaleur

Le dimensionnement s'effectue en deux temps :

- On évalue une aire d'échange approximative et on fixe la géométrie de l'appareil qui vérifie les contraintes hydrodynamiques.
- On vérifie que cette géométrie permettra d'assurer le transfert de chaleur.

### 1. Différentes étapes du dimensionnement

- On fixe les débits des fluides ou leurs températures de sortie. On définit leur circulation et on calcule le flux de chaleur  $Q$  à échanger.

- On choisit une valeur du coefficient  $U_s$  d'après les ordres de grandeurs expérimentaux et on calcule l'aire d'échange  $A$  de l'appareil

- On choisit le diamètre des tubes et on calcule le nombre de tubes par passe pour assurer une vitesse convenable du fluide dans les tubes. On fixe la longueur de l'appareil. Les tubes étant généralement disponible par longueur de 6 m, on choisit une longueur  $L$  telle que  $L/6$  soit entier. On détermine alors le nombre de passes dans les tubes pour assurer une aire d'échange voisine de  $A$ .

- On calcule la perte de charge dans les tubes (après avoir recalculé la vitesse exacte du fluide) et on compare cette valeur à la perte de charge admissible

Si le test est négatif, on reprend le calcul à l'étape 3 soit en modifiant le diamètre des tubes, soit la vitesse des fluides.

Si le test est positif, on passe à l'étape 5.

- On fixe la disposition des tubes dans l'enveloppe (il existe des normes standards) et on calcule le diamètre de l'enveloppe. Si l'on choisit un échangeur à plusieurs passes cotés enveloppe, on doit prévoir la mise en place de chicanes longitudinales et vérifier que le facteur correctif  $Y$  est supérieur à 0,85.

Si l'on choisit un seul passage du fluide dans l'enveloppe, on prévoit la mise en place de chicanes transversales (l'écartement de ces chicanes est en général voisin du diamètre de l'enveloppe).

- On calcule la perte de charge dans l'enveloppe et on la compare à la perte de charge admissible.

Si le test est négatif, on revient à l'étape 5.

Si le test est positif, on passe à l'étape 7.

On dispose alors d'un échangeur de surface  $A^*$  (qui peut être légèrement différente de  $A$ ). Il faut maintenant vérifier que cet échangeur assurera le transfert du flux  $Q$ .

- On calcule le coefficient d'échange  $U$  pour l'échangeur propre. A cet effet on doit calculer les coefficients particuliers  $h_i$  et  $h_e$

- On réévalue le coefficient d'échange  $U_s^*$

- On compare  $1/UA^*$  et  $1/U_s^* A^*$

Si  $1/UA^* - 1/U_s^* A^* < R_{di} + R_{de} \Rightarrow$  L'appareil est sous dimensionné

Si  $1/UA^* - 1/U_s^* A^* > R_{di} + R_{de} \Rightarrow$  L'appareil est sur dimensionné

On reprend le calcul à la phase 2 en choisissant une valeur plus convenable pour  $U$ .

Si  $1/UA^* - 1/U_s^* A^* = R_{di} + R_{de} \Rightarrow$  L'appareil convient

## 2. Données sur les fluides et matériau :

<u>Données sur les fluides et matériau</u>				
		Calandre		Tube
	Nom des fluides et des matériaux	Vapeur	AISI 316L	Huile
$\rho$ :	Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1,129		934
$C$ :	Capacité calorifique moyenne (J/Kg.k)	2120,8		2157,5
$\lambda$ :	Conductibilité thermique moyenne (W/m.k)	0,027		0,13125
$R$ :	Résistance à l'encrassement (W/m <sup>2</sup> .k)	$1,00 \cdot 10^{-4}$		$1,80 \cdot 10^{-4}$
$W$ :	Débit massique moyen (Kg/s)	0,1823		1,1944
$\Theta_e$ :	Température d'entrée (C)	180,0		8,0
$\Theta_s$ :	Température de sortie (C)	100,0		20,0
$\mu$	Viscosité (pa.s)	$1,30 \cdot 10^{-4}$	Entrée	$5,14 \cdot 10^{-2}$
$\mu$	Viscosité (pa.s)	$2,80 \cdot 10^{-4}$	Sortie	$5,7 \cdot 10^{-2}$
<u>Spécification</u>				
	Perte de charge admissible (bar)	0,3		0,5
<u>Tubes</u>				
$\lambda_t$ :	Conductibilité thermique moyenne (W/m.k)		16,3	
$e$ :	Epaisseur des tubes (mm)		11,5	
$d_e$ :	Diamètre des tubes (mm)		12,7	
<u>Calandre</u>				
$d_c$ :	Diamètre de la calandre (cm)		19,5	
<u>Choix du coefficient global de transfert</u>				
	Coefficient global de transfert initial (Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)	200	836 KJ/h.m <sup>2</sup> .°C	

*Tableau 2 : Données sur les fluides et matériau*

### 3. Résultats :

<u>Résultats obtenus</u>				
Q :	Flux de chaleur échangé (KJ/h)	111327		
W <sub>c</sub> :	Débit de la vapeur (Kg/h)	656,16		
Δθ <sub>ml</sub> :	DTLM	122,88		
A :	Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	1,98		
n <sub>t</sub> :	Nombre des tubes	28		
L :	Longueur des tubes (m)	1		
A* :	Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	1,12		
		Tube		Calandre
V :	Vitesse des fluides (m/s)	0,36		5,41
Re :	Nombre de Reynolds	78,79		8129,96
f <sub>D</sub> :	Coefficient de frottement	0,81		0,033
ΔP :	Perte de charge (bar)	0,039		2,82.10 <sup>-5</sup>
Num :	Nombre de Nusselt	5360,03		18,33
h :	Coefficient local particulier d'échange (W/m <sup>2</sup> .K)	55290,68		32,994
A :	Surface d'échange	3,55.10 <sup>-3</sup>	4,25.10 <sup>-3</sup>	4,95.10 <sup>-3</sup>
U <sub>s</sub> :	Coefficient global d'échange (W/m <sup>2</sup> .K)	120		

*Tableau 3 : Résultats du dimensionnement*

# Conclusion

Les échangeurs à plaques sont des appareils compacts de très hautes performances.

Leurs avantages sont liés à leur faible encombrement, leurs coefficients de transfert de chaleur élevés, le faible coût de l'installation et la possibilité de nettoyer ou modifier la surface d'échange.

Les inconvénients de ces échangeurs sont liés à leurs avantages : fortes pertes de charges dans l'installation et difficultés de fonctionnement pour des débits chauds et froids très différents.

C'est la raison pour laquelle on a effectué le dimensionnement d'un échangeur tubulaire possédant plusieurs avantages tels que sa facilité de fabrication et d'entretien, son faible coût, sa gamme étendue de fonctionnement en température et en pression, et sa relative compacité.

Le calcul effectué a démontré que la perte de charge peut diminuer si on utilise un échangeur tubulaire. Pour l'échangeur à plaques, elle est égale à 250 Pa pour la vapeur et 93700 Pa pour l'huile, tandis que pour l'échangeur tubulaire elle est égale à 36,70 Pa pour la vapeur et 3900 pour l'huile.

ANNEXE

## Contrôles de qualité

Le laboratoire de la raffinerie piloté par un laboratoire central assure à la réception de l'huile brute des analyses de pureté. Il assure en permanence lors de la production des analyses de qualités, pour vérifier l'efficacité de chaque opération élémentaire faite.

Préparation de l'échantillon pour l'essai	NM08.5.018
Détermination de l'acidité	NM .08.5.001
Détermination de la teneur en eau et en matières volatiles	ISO 662
Détermination de l'indice de peroxyde	NM.08.5.005
Détermination de la densité	NM.08.5.020
Détermination de la teneur en impuretés	ISO663
Détermination de la teneur en phosphore	NM.08.5.016
Détermination de la teneur en Insaponifiable	ISO 3596-1 et 2
Absorbance Spécifique au rayonnement UV	COI/T.20/DOC.N19
Détermination de la teneur en savon	NM.08.5.021
Mesure de degré de concentration	NM.08.2.002
Détermination de l'indice de saponification	NM.08.5.003
Détermination de l'indice d'iode	NM.08.5.009
Détermination de la teneur en cires	NGDC-1988
Teneur en matières grasses dans les savons	NF V03-905

*Tableau 4 : Normes respectées par la société pour chaque analyse*

### 1. Huile brute :

Les critères d'acceptation d'une huile sont spécifiés dans les contrats d'achat et vérifiés par des analyses à la réception pour s'assurer que l'huile reçue est conforme aux spécifications.

Les analyses effectuées à la réception d'une huile brute sont les suivantes :

- La teneur en eau et en matières volatiles
- Acidité et indice d'acide
- L'indice de peroxyde
- La teneur en phosphore
- La nature des acides gras



- La nature des stérols

### 1.1. La teneur en eaux et en matières volatiles :

L'eau est présente dans la graine naturellement, on la retrouve dans l'huile à cause des processus d'extraction et par l'hydrolyse des triglycérides.

L'analyse de la teneur en eau et en matières volatiles consiste à mesurer la perte en poids d'une quantité d'huile après l'avoir séchée, cette perte correspond à la masse d'eau présente dans cette huile.

Le calcul est établi à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{PE - PS}{PE} \times 100$$

Avec : PE= la prise d'essai et PS= le poids sec.

### 1.2. Acidité et indice d'acide :

L'acidité est le pourcentage d'acide gras libre exprimé conventionnellement, selon la nature des corps gras, en acide oléique, palmitique ou laurique.

Quand le terme acidité n'est suivi d'aucune indication, il s'agit de l'acidité exprimé en acide oléique.

On entend par indice d'acide d'un corps gras, le nombre de milligramme de potasse nécessaire pour neutraliser l'acidité libre d'un gramme de corps gras.

On met en solution une quantité connue de matière grasse dans un mélange d'éthanol et d'oxyde éthylique, puis on titre les acides gras libres présents par une solution éthanolique d'hydroxyde de potassium.

Les résultats sont exprimés ainsi :

$$\text{Acidité} = \frac{N \times V \times M}{10 \times PE}$$

$$\text{Indice d'acide} = \frac{56,1 \times N \times V}{PE}$$

Avec : N= normalité exacte de KOH, M= Masse moléculaire adoptée pour l'expression (acide oléique, laurique...)

### 1.3. Indice de peroxyde :

C'est le nombre de microgrammes d'oxygènes actifs du peroxyde contenu dans un gramme de corps gras et susceptibles d'oxyder l'iodure de potassium KI avec libération d'iode.

Les peroxydes sont des éléments nocifs pour la santé produits de l'oxydation des huiles. La détermination de cet indice est un moyen pour prévoir une détérioration ultérieure des qualités de l'huile.

Le principe est le traitement d'une prise d'essai en solution dans l'acide acétique et du chloroforme par une solution de potassium et le titrage de l'iode libéré par une solution de thiosulfate de sodium.

Le résultat s'exprime comme suit :

$$Ip = \frac{V \times 1000 \times N}{PE}$$

Avec : V= volume de la solution de thiosulfate de sodium en ml, N= Normalité de la solution de thiosulfate.

### 1.4. Nature des acides gras : Aïcha

Il existe des normes internationales qui définissent les pourcentages de chaque type d'acides gras dans les différentes huiles.

Les principaux acides gras analysés par chromatographie en phase gazeuse sont :

Acide myristique (C14 :0), palmitique (C16 :0), palmitoléique (C16 :1), heptadecanoïc (C17 :0), heptadécanoïque (C17 :1), stéarique (C18 :0), oléique (C18 :1), linoléique (C18 :2), linoléique (C18 :1), arachidique (C20 :0), gadoléique (C20 :1), béhénique (C22 :0).

Ils sont reconnus par le Chromatogramme par leur temps de rétention spécifique.

On arrive donc, à partir des résultats obtenus et grâce aux fourchettes de variation des concentrations de chaque acide gras, à juger la pureté de l'huile.

### 1.5. Analyse des stérols :

Cette analyse est très importante dans le contrôle de la pureté des corps gras. Par séparation de la partie insaponifiable du corps gras on peut obtenir les stérols et les analyser par CPG

L'analyse contient donc deux parties :

- Isolation de l'insaponifiable : Saponification du corps gras et extraction de l'insaponifiable au moyen d'un solvant.
- Séparation des stérols par CPG.

## 2. Huile en cours de production :

### 2.1. Teneur en phosphore :

Le phosphore présent dans l'huile sous forme de phospholipides peut lui conférer un goût désagréable et peut même favoriser son oxydation.

Cette analyse est effectuée pour s'assurer que l'étape pendant laquelle on élimine le phosphore (la démulcination) s'est bien passée.

Le principe est l'incinération de la prise d'essai puis l'attaque nitrique des cendres entre les ions phosphoriques et les ions vanadique et molybdiques et détermination de la coloration obtenue.

La teneur en phosphore dans le corps gras en ppm est égal à :  $\frac{M \times 100}{PE}$

Avec : M= concentration en mg de phosphore lue sur la courbe d'étalonnage.

### 2.2. Teneur en savons :

Pour diminuer l'acidité de l'huile, on neutralise les acides gras libres présents dans cette huile par une base et on les élimine sous forme de savon. Cependant, il se peut que des traces de savons restent dans l'huile. Cette analyse est importante pour s'assurer qu'il ne reste plus de savons.

Le principe est un titrage volumétrique dans l'acétone à 2% d'eau par l'acide chlorhydrique en présence de bleu de bromophénol comme indicateur coloré.

Les savons dissous, exprimés en oléate de sodium sont donnés par la formule suivante :

$$\text{Les savons} = \frac{T \times V \times 30,4}{PE}$$

Avec : T= titre de l'acide, V= volume de l'acide chlorhydrique en ml.

### 2.3. Perte en matière grasse :

#### 2.3.1. Dans la pâte de neutralisation :

Le corps gras total présent dans la pâte est obtenu par décomposition de celle-ci en milieu acide fort et extraction par l'hexane.

Les résultats sont exprimés ainsi :  $\frac{P2-P1}{PE} \times 100$

Avec : P1= ballon vide, P2= ballon + MG

### 2.3.2. Dans les eaux de lavage :

Par extraction à l'hexane la perte en matière grasse dans les eaux de lavage est exprimée ainsi :

$$\frac{P2-P1}{PE} \times 100$$

### 2.3.3. Dans la terre de décoloration :

La mesure de la perte en matière grasse dans les terres se fait par extraction à l'aide de l'appareil de Soxhlet. Par différence de poids on peut calculer le pourcentage de la matière grasse comme suit:  $\frac{P2-P1}{PE} \times 100$

## 2.4. Quantité d'impuretés :

Les impuretés insolubles présentes dans l'huile peuvent être soit des matières minérales, de la poussière, des traces de terre décolorantes et d'autres éléments.

Cette méthode d'analyse consiste à séparer la matière grasse des impuretés par séchage et filtration après ajout de l'hexane.

Le pourcentage des impuretés est ainsi déduit par différence de poids :  $\frac{M2-M1}{PE} \times 100$

Avec : M2= masse du papier après filtration et M1= sa masse avant filtration.

## 2.5. La transmittance :

C'est un paramètre qui permet de savoir l'intensité de la couleur d'une huile.

Cette mesure est effectuée à l'aide d'un spectromètre réglé à 420nm.

## 3. Objectifs de qualité :

Le tableau ci-dessous regroupe les objectifs de qualité relatifs aux produits :

Produit	Paramètre	Objectif	Tolérance
Huile de table en cours de raffinage	Acidité (huile acide)	Max 65%	± 10%
	Trace de savon (huile neutralisée)	Max 100%	Max 100ppm
	Teneur en eau (huile neutralisée)	Max 0,5%	Max 0,6%
	Acidité (huile neutralisée)	Max 0,05%	Max 0,1%
	Teneur en phosphore (huile désodorisée)	Max 5ppm	Max 10ppm
	Acidité (huile désodorisée)	0meq/Kg	Max 0,5meq/Kg
	Indice de peroxyde (huile désodorisée)	0ppm	Max 0,5 ppm
	Trace de savon (huile désodorisée)	0ppm	Max 50ppm
Produit fini	Acidité	Max 0,05%	Max 0,06%
	Indice de peroxyde	0,5meq/Kg	Max 1meq/Kg
	Trace de savon	0ppm	Max 50ppm
	Teneur en phosphore	Max 5ppm	Max 10ppm
	Transmittance à 420nm	60%	± 10%
Huile conditionnée	Volume rempli (bouteille de 1l)	1l	± 10ml
	Volume rempli (bouteille de 2l)	2l	± 20ml
	Volume rempli (bouteille de 3l)	3l	± 30ml
	Volume rempli (bidon de 5l)	5l	± 50ml

***Tableau 5 : Objectifs de qualité***

# Références

- <https://fr.wikipedia.org>
- <http://aicha.com/fr/index.html>
- <http://pozza.org/tournesol>
- <http://joho.monsite.orange.fr>
- <http://processs.com>
- <http://chemicalogic.com>
- <http://thermexcel.com/french/index.htm>
- <http://institut.hvp.free.fr>
- Manuel des corps gras A. KARLESKIND coordonnateur